第38卷 第3期
2021年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 3
May 2021

3种低立式沙障内表层沉积物粒度特征研究

祁 帅[1]，汪 季[1,2]，党晓宏[1,2]，魏亚娟[1]，丁奋谦[1]

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，中央与地方共建风沙物理重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站，内蒙古 鄂尔多斯 017400)

摘 要： 以库布齐沙漠兴巴高速南铺设3 a的3种(PLA沙障、沙柳沙障、HDPE沙障)同种规格不同材料沙障为研究对象，通过采集沙障内表层0~2 cm沉积物样品，利用激光粒度仪测定样品机械组成，分析了平均粒径、标准偏差、偏度、峰态和分形维数等参数。结果表明：(1) 以中、细砂为主，其含量约为77.83%~98.00%，黏粒和粉粒的含量均不超过5%；沙丘迎风坡坡底PLA和HDPE沙障内表现为轻度风蚀，颗粒粒径偏粗；沙柳沙障自坡底到坡顶，障格内粒径逐渐增大，在坡顶处发生蚀积转换。(2) 整体上沙障内沉积物分选性较差，偏度向正偏或负偏发展，峰态向尖窄发展，分形维数在1.94~2.20，优势粒级向细砂转变。(3) 不同类型沙障对沉积物的影响具有一定差异性，HDPE沙障和PLA沙障内沉积颗粒分布更为广泛，而沙柳沙障则相对集中，且都趋于细化；对土壤颗粒组成优化表现为HDPE沙障>沙柳沙障>PLA沙障。

关键词： 低立式沙障；迎风坡；粒度特征；分形维数；库布齐沙漠

机械沙障作为防治风沙危害的主要措施之一，目前在我国沙漠化防治中得到广泛应用[1-3]。沙障通过改变下垫面的性质，增加地表空气动力学粗糙度，能够降低风速，拦截过境风沙流，减弱风蚀，从而发挥防风固沙作用[4-5]。由于沙障构成材料、规格形状以及使用区域风况和地貌形态的多样性，不同沙障的固沙效果有较大差异。科学选择沙障，是长期稳定发挥沙障固沙作用的重要基础[6]。众多研究者以沙障铺设后的风沙流结构、粗糙度、风速廓线、输沙通量以及蚀积特征等为主要指标评价沙障的防护效益[7-11]。沉积物颗粒作为自然长期风化、侵蚀、搬运、沉积的产物，各径级颗粒百分含量与土壤结构、土壤肥力及水分运动密切相关，并反映了土壤的风蚀状况[12]；沉积物粒度特征也是风沙地貌研究的主要指标之一[13]，被广泛应用于风沉积[14]、海洋沉积[15]和湖泊沉积[16]的比较和成因分析中。因此，沙障内砂粒的粒度特征可以反映过境风沙流的运移、分选和沉积状况[17]，相比于单次测得的防风固沙效益，沉积物的粒度特征更能全面反映沙障的防护效益。

基于此，本文以库布齐沙漠独贵塔拉段公路为研究区，以公路两侧坡底、坡中和坡顶的PLA、沙柳和HDPE低立式沙障内表层(0~2 cm)沉积物为研究对象，对比分析不同沙障内的沉积颗粒粒径组成、平均粒径、标准偏差、偏度、峰态和分形维数等参数，探明3种沙障的防护效益以及对土壤粒级组成改良效果的差异，为我国干旱、半干旱等地区沙障的选择、配置提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于杭锦旗独贵塔拉镇兴巴高速南侧(图1)，地理位置位于40°43′N，108°58′E，处于干旱、半干旱区过渡地带，属典型温带大陆性气候，海拔1000~1400 m，年平均降雨量203~418 mm，年均蒸发量2148.5 mm；年均风速4.5 $m\cdot s^{-1}$，最大风速23 $m\cdot s^{-1}$，年大风日数25~35 d。该区域主要景观为流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘，主要土壤类型为风沙土，主要植物种有沙米(*Agriophyllum squrrosum*)、沙竹(*Psammochloa villbsa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、虫实(*Corispermum declinatum*)、沙蒿(*Artemisia*

收稿日期： 2020-07-03； **修订日期：** 2020-11-06
基金项目： 国家重点研发专项(2018YFC0507101)
作者简介： 祁帅(1995-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 1182843101@qq.com
通讯作者： 汪季. E-mail: wangji1957@163.com

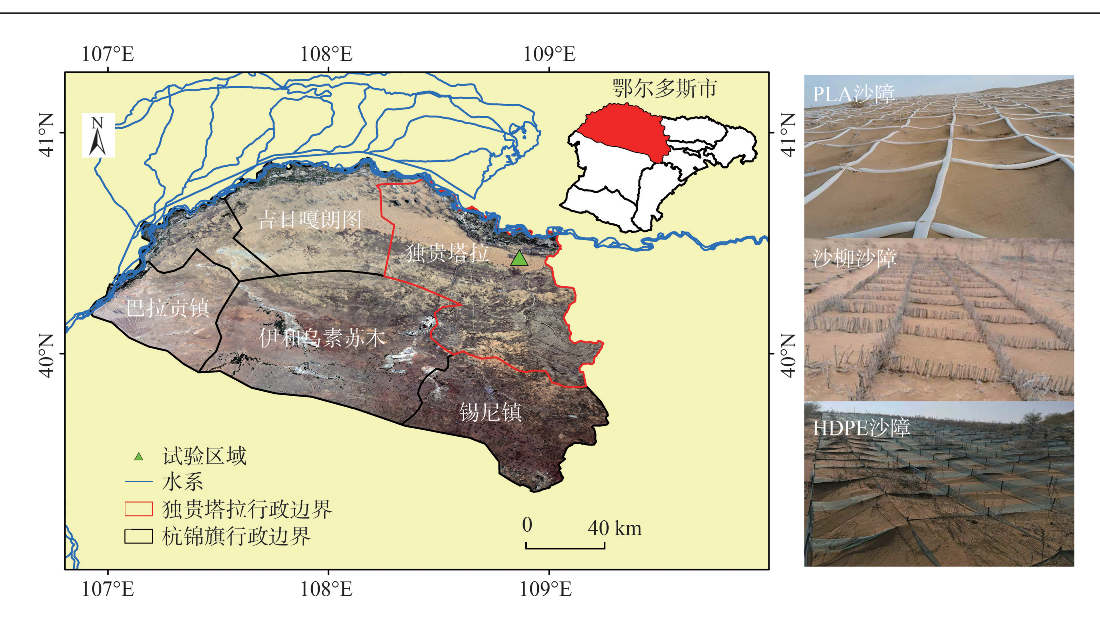


图1 研究区地理位置及沙障类型

Fig. 1 Geographical location and sand barrier types of the study area

ordosica)等[18]。

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

2016年在独贵塔拉兴巴高速路南铺设了PLA沙障、沙柳沙障、HDPE沙障,3种沙障都为低立式沙障,规格为2 m×2 m(表1)。2019年7月8日,在该区沙障内采样,采样前后一个星期内无大风和降雨。根据相似相近原则,选择4个形态、坡度和坡长相近的沙丘,其中迎风坡坡度约为19°,坡长约为40 m,坡向一致,均为东西走向,且植被盖度不超过5%。分别在沙丘迎风坡的坡顶、坡中和坡底使用自制分层取土器[19]于沙障方格内的4角和中心5点采集表层0~2 cm的土壤样品,各部位取3个重复,以裸沙丘作为对照,共取样36个,将采集的重复样品混合均匀,带回实验室自然风干。

先剔除风干土壤中的杂质,用土壤筛筛除直径大于2000 μm的粗颗粒。然后分别称取10 g土样加入50 mL玻璃烧杯中,再加入45 mL III级超纯水充分浸没样品,随后加入1~2滴30% H_2O_2溶液,静置24 h,充分去除土样中的有机质。待到烧杯内无气泡产生时,用电热板加热干燥样品,将反应剩余的H_2O_2完全挥发。待样品冷却后,再加入水,并加1~2 mL 10%HCl溶液,以溶解样品中的碳酸盐类物质,随后再静置24 h,用滴管移出上清液。使用MIK-PH173型pH计测试样品的pH,加入纯净水稀释3~4遍,直至pH呈中性[17]。土壤粒度测定使用德国Analysette 22 Micro Tec Plus型号激光粒度仪,该仪器的测量范围为0.01~2100 μm,分辨率高于0.1 μm,单次测量时间为5~10 s,一个循环周期为2 min,通过激光散射对样品进行测定,每个样品重复测定3次。

表1 沙障概况

Tab. 1 General information of the different sand barrier

沙障类型	规格	障高/cm	孔隙度/%
沙柳沙障	2 m×2 m	25	50
PLA沙障	2 m×2 m	10	0
HDPE沙障	2 m×2 m	15	40

2.2 土壤参数计算模型

土壤机械组成颗粒粒径依据美国制(US-DA)[20]标准划分为:砾石(>2000 μm)、极粗砂(1000~2000 μm)、粗砂(500~1000 μm)、中砂(250~500 μm)、细砂(100~250 μm)、极细砂(50~100 μm)、粉粒(2~50 μm)、黏粒(<2 μm)。使用克鲁宾(Krunm-dein,1934)根据伍登-温德华(Udden-Wenworthseale)的算法进行粒径真值对数转化5%,16%,25%,50%,75%,84%,95%所对应的Φ值,计算公式如下:

$$d = \log_2 D \quad (1)$$

式中:D为沉积颗粒粒径(mm);d为Φ值。

采用Folk-Ward的图解法计算平均粒径(D_0)、标准偏差(σ)、偏度(SK)与峰态(Kg)等粒度参数[5]。利

用激光粒度仪测定土壤不同粒径的体积含量，并按如下公式计算分形维数[21]：

$$\frac{V_{(r<R_i)}}{V_t}=\left(\frac{R_i}{R_{max}}\right)^{3-D} \tag{2}$$

式中：D为土壤分形维数；r为粒径大小(mm)；R_i为第i个粒径的直径(mm)；R_{max}为最大粒径(mm)；$V_{(r<R_i)}$为粒径小于i粒径的体积含量(%)；V_t为所有粒径体积含量之和(%)。

2.3 数据处理

使用Excel 2010和Origin 2018进行数据计算、分析和图表绘制，采用SPSS 25对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和LSD多重检验。

3 结果分析

3.1 不同类型沙障内沉积物粒度组成

由表2可知，研究区地表颗粒主要以细砂和中砂为主，平均百分含量为77.83%~98.00%，粉粒、黏粒的含量均不超过5%。与对照相比，坡底、坡顶处沙障内中砂含量显著减少($P<0.05$)，不同沙障内粗砂、极粗砂含量从坡底到坡顶逐渐降低，与对照变化规律相反；除PLA沙障坡底外，沙障内极细砂、黏粒和粉粒百分含量较对照均明显增加($P<0.05$)。沙丘迎风坡沙障内粒度组成分布更广范，沉积物的粒径组成逐渐变细，表现为HDPE沙障>沙柳沙障>PLA沙障>裸沙丘。

3.2 不同类型沙障内沉积物粒度特征

3.2.1　平均粒径　由表3可知，裸沙丘的平均粒径为1.68Φ~2.02Φ，平均值为1.87Φ；PLA沙障内沉积物平均粒径为1.59Φ~2.15Φ，平均值为1.92Φ；沙柳沙障内沉积物平均粒径为2.10Φ~2.26Φ，平均值为2.18Φ；HDPE沙障内沉积物平均粒径为1.97Φ~2.25Φ，平均值为2.08Φ，铺设沙障后沙丘迎风坡粒度特征Φ值变大，细粒含量显著增加($P<0.05$)，其增幅表现为沙柳沙障>HDPE沙障>PLA沙障>裸沙丘。沙障的设置导致沙丘不同部位颗粒重新分配，由坡底到坡顶，裸沙丘沉积物平均粒径先增加后降低，PLA沙障呈现出逐渐增大趋势，而沙柳沙障逐渐降低，HDPE沙障则与之相反。

3.2.2　标准偏差　由表3可知，研究区3种沙障(PLA沙障、沙柳沙障和HDPE沙障)内沉积物的标准偏差均值分别为0.66、0.55、0.66，裸沙丘标准偏差为0.49，沙障内沉积物的标准偏差与裸沙丘相比有所增加；其中，坡底PLA和HDPE沙障内沉积物标准偏差为0.91和0.92，较裸沙丘增加显著($P<0.05$)。反映出风沙活动下的土壤粒度变化的差异性和复杂性，沙障的防护有效降低了气流对土壤颗粒的分选作用。

3.2.3　偏度　通过表3可知，坡底位置PLA和HDPE沙障内的沉积物偏度值为−0.19和−0.12，表现为负

表2　不同沙障内沉积物粒度组成

Tab. 2　Grain size composition of sediments in different sand barriers　/%

沙障类型	坡位	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
		<2 μm	2~50 μm	50~100 μm	100~250 μm	250~500 μm	500~1000 μm	1000~2000 μm
裸沙丘	坡底	0.20±0.01Aa	0.73±0.06Ab	0.67±0.06Aa	42.90±0.44Bb	54.50±0.2Db	0.83±0.35Aa	0.23±0.13Aa
	坡中	0.20±0.03Aa	0.80±0.05Ab	0.77±0.06Ab	52.53±0.68Cc	43.70±0.95Ba	1.07±0.21Ba	0.87±0.58Aa
	坡顶	0.10±0.04Ab	0.47±0.06Aa	1.03±0.06Bb	26.03±0.65Aa	68.23±0.67Dc	4.10±0.17Bb	0Aa
PLA沙障	坡底	0.23±0.06Aa	0.70±0.04Aa	1.20±0.05Bb	35.23±0.81Aa	42.60±0.95Cb	14.23±1.33Cc	5.83±1.68Bb
	坡中	0.37±0.06Bb	1.33±0.06Bc	2.23±0.06Cc	48.30±0.44Bb	45.17±0.61Cc	2.13±0.25Cb	0.43±0.23Aa
	坡顶	0.30±0.05Bab	0.80±0.03Bb	0.83±0.06Aa	62.80±0.85Cc	35.20±0.82Ba	0.07±0.12Aa	0Aa
沙柳沙障	坡底	0.37±0.06Ba	1.30±0.07Bb	2.47±0.12Cb	67.43±0.8Db	25.77±0.25Aa	2.03±0.59Ab	0.50±0.35Aa
	坡中	0.37±0.06Ba	1.53±0.06Bc	3.53±0.12Dc	57.63±0.7Da	34.93±0.15Ab	1.53±0.42Bb	0.53±0.15Aa
	坡顶	0.27±0.06Ba	0.90±0.06Ca	1.00±0.05Ba	57.57±0.5Ba	39.33±0.29Cc	0.33±0.32Aa	0.53±0.45Aa
HDPE沙障	坡底	0.37±0.06Bab	2.27±0.06Cb	4.47±0.12Dc	49.07±1.58Cb	31.83±1.63Bb	8.13±1.79Bb	3.90±2.3Bb
	坡中	0.30±0.04Ba	1.27±0.06Ba	1.13±0.06Ba	46.40±0.92Aa	50.00±0.66Dc	0.53±0.15Ab	0.37±0.15Ab
	坡顶	0.43±0.06Cb	3.07±0.06Dc	2.33±0.06Cb	65.37±0.40Dc	28.80±0.36Aa	0Aa	0Aa

注：大写字母表示不同类型沙障内沉积物在同一坡位差异显著($P<0.05$)；小写字母表示同一类型沙障内沉积物在不同坡位差异显著($P<0.05$)。下同。

表3　不同类型沙障内沉积物粒度特征

Tab. 3　Grain size characteristics of sediments in different types of sand barriers

沙障类型	坡位	平均粒径/Φ	标准偏差	偏度	峰态	分型维数
裸沙丘	坡底	1.90±0.01Ba	0.48±0.01Aa	0.08±0.01Bc	0.99±0.01Aa	2.04±0.0ABa
	坡中	2.02±0.01Cc	0.52±0.01Ba	0.06±0.02Aa	1.00±0.01Aa	2.05±0.04Ba
	坡顶	1.68±0.01Aa	0.48±0.01Ab	0.11±0.01Cb	0.99±0.03Aa	1.95±0.03Aa
PLA沙障	坡底	1.59±0.08Ab	0.91±0.06Cb	−0.19±0.05Aa	1.14±0.03Cb	2.07±0.03Ba
	坡中	2.01±0.01Bb	0.61±0.01Bb	0.09±0.01Ab	1.01±0.01Bb	2.15±0.02Ac
	坡顶	2.15±0.01Cc	0.46±0.01Aa	0.08±0.01Aa	0.97±0.02Ab	2.10±0.04Bb
沙柳沙障	坡底	2.26±0.01Cc	0.54±0.02Ba	0.05±0.01Bc	1.02±0.01Ba	2.12±0.06Bab
	坡中	2.17±0.01Bd	0.61±0.02Cb	0.08±0.01Bb	1.04±0.01Cc	2.16±0.02Ac
	坡顶	2.10±0.01Ab	0.51±0.01Ac	0.07±0.01ABa	0.98±0.03Ac	2.09±0.03Bb
HDPE沙障	坡底	2.02±0.07Bd	0.92±0.07Cb	−0.12±0.06Ab	1.35±0.04Cc	2.18±0.02Bb
	坡中	1.97±0.01Aa	0.53±0.01Aa	0.11±0.03Bc	1.01±0.01Aab	2.12±0.05Ab
	坡顶	2.25±0.02Cd	0.54±0.01Ad	0.18±0.01Cc	1.13±0.01Bd	2.20±0.01Cc

偏，沙柳沙障则呈近对称分布。坡中和坡顶位置，PLA沙障和沙柳沙障内沉积物偏度为近对称；HDPE沙障内偏度为正偏。以上结果说明，沙障内沉积物偏度向正偏或负偏发展，优势粒径发生转变。

3.2.4　峰态　通过表3可知，裸沙丘和3种沙障沉积物的峰态变化趋势与分选系数一致，分布集中程度为：HDPE沙障(1.16)>PLA沙障(1.04)>沙柳沙障(1.01)>裸沙丘(0.99)，按照分级标准[21]，PLA沙障、沙柳沙障、裸沙丘沉积物的峰态为中等，HDPE沙障内沉积物的峰态为尖窄。

3.2.5　分形维数　研究区风蚀作用强烈，土壤主要为风沙土，结构和质地较差。裸沙丘和3种沙障内沉积物分形维数均偏低，沙障铺设后沙丘各部位沉积物的分型维数显著提高(P<0.05)，增幅表现为HDPE沙障>沙柳沙障>PLA沙障>裸沙丘。

4　讨论

研究区气候干燥，受频繁风沙活动的严重影响，裸沙丘地表的细颗粒极易被吹蚀，沉积物的机械组成中粗粒含量相对增加，造成地表沉积物不断粗化。在风沙活动过程中，地表颗粒的搬运沉积90%集中在0~30 cm，80%集中在0~10 cm[22]。因此，一般选用的沙障为低立式沙障，既能有效的控制风沙活动，又能降低固沙成本。本研究中的3种沙障全部为低立式沙障，由于其材质和规格，以及在坡面位置的不同，其防护效果上表现出一定的差异性。设置沙障后气流经过沙丘的剪切力降低，导致砂粒起动风速提高，地表风蚀程度降低。

4.1　沙障内沉积物在地形上分布的差异性

沙柳沙障从坡底到坡顶沉积物颗粒逐渐变细，丘间低地、迎风坡下部沙障对风速的影响作用较为显著，而在风速最大区域的沙丘顶部，沙障对风速的降低作用比丘间低地有所降低[18,23]。因此，坡底沙障内风速远小于起沙风速，极细砂、粉粒和黏粒等细小颗粒难以被吹蚀；坡中中砂含量增加，这是由于气流在爬升的过程中汇聚加速到坡中，沙障此时的防风效能小于起沙风，气流剪切力逐渐增加变得不稳定、不饱和，一些较小的沉积颗粒开始被吹蚀，导致坡中到坡顶的中砂含量增加。随着风沙运动到达坡顶过程中，气流逐渐达到饱和，大量砂粒沉积使坡顶沙障被沙埋，极大的减弱了沙障防风固沙效益，坡顶出现风蚀，导致细粒含量相对减少。

研究中发现在坡底PLA沙障内粗砂、中砂含量增加，在坡中、坡顶减少，极细砂增加，这与丁延龙等[5]研究PLA沙障的阻滞作用使中砂、粗砂含量升高，细颗粒含量降低结论相悖。丁延龙等[5]研究还发现，PLA沙障所在的沙丘迎风坡处于沉积环境，经过8 a的沉积，坡顶沙障被沙埋大大降低了沙障防护效益，转换为风蚀状态，导致表层颗粒趋于粗化。本研究的PLA沙障铺设年限只有3 a，沙障障体出露地表迫使气流抬升，气流汇聚加速，迎风坡坡底为风蚀环境，部分较细的砂粒被剥离，较粗砂粒难以移动停留在原地；由于粗细砂粒沉积速率的差异，迎风坡中下部土壤颗粒多为粗砂粒，细颗粒(细砂、

极细砂、黏粒和粉粒)则出现在沙丘的顶部和背风坡[24]。HDPE沙障内沉积物与PLA沙障内沉积物的粒径组成和粒度特征变化一致,但其对气流的疏导作用较PLA沙障强。

4.2 沙障性质对沙障内沉积物分布的影响

相同平面规格的方格沙障,外露高度越大,防风效果越显著,沙障外露高度以下的风速明显被削减,越接近地面消减作用越显著,外露高度以上因沙障的抬升作用而迅速增加[25]。从表1可以看出,沙障内细粒含量沙柳沙障最高,HDPE沙障次之,PLA沙障最低,粗砂和极粗砂的含量则相反。沙柳沙障和HDPE沙障为透风型沙障,部分气流遇到沙障后可穿过孔隙,此时气流被削减极易发生沉积;而PLA沙障为圆柱实体型沙障,其对气流只有阻挡和抬升作用,在被沙障削弱能量的部分气流越过沙障障体后形成紊流和涡旋,产生小量风蚀[26]。风沙流中,0~10 cm高度内粒径在2.32Φ~2.74Φ(细砂)里的沙粒极易被风蚀[27],沙障的防护作用使沙障内沉积物主要以细砂为主,而裸沙丘以中砂为主。沙障越高沙障内细粒含量越多,反之粗粒含量较多,实体型PLA沙障坡底粒径相对较粗。这与张帅等[28]在沙障防风效果与高度呈正相关关系,与孔隙度呈负相关关系,高度和孔隙度对沙障防风效能的影响较大的研究结论并不完全一致。

5 结 论

通过对库布齐沙漠沙丘迎风坡3种低立式沙障(PLA沙障、沙柳沙障、HDPE沙障)内表层沉积物粒度特征分析,得出以下结论:

(1) 研究区土壤粒度分布较为集中,中砂和细砂的百分含量约为77.83%~98.00%。坡底PLA沙障、HDPE沙障对气流具有明显抬升作用,在沙障后产生涡流,沙障障格内发生风蚀,粗砂含量较对照分别增加16.14%、15.97%。

(2) 沙障内沉积物分选性均低于裸沙丘;偏度向正偏或负偏发展;峰态向尖窄发展。沙障内沉积物分形维数出现不同程度增加,表现为坡顶>坡底>坡中。沙障设置后地表粒径分布更为广泛并趋于细化,且在风沙活动较强的坡顶区域表现更为显著。

(3) 综合迎风坡3种不同类型低立式沙障内沉积物的粒径组成、粒度特征和分形维数,对土壤颗粒组成优化表现为HDPE沙障>沙柳沙障>PLA沙障。

参考文献(References):

[1] 袁立敏, 黄海广, 闫德仁, 等. 不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 172-179. [Yuan Limin, Huang Haiguang, Yan Deren, et al. Study on the effect of wind protection and sand fixation of banded sand barriers under different sand burial levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 172-179.]

[2] 居炎飞, 邱明喜, 朱纪康, 等. 我国固沙材料研究进展与应用前景[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 138-144. [Ju Yanfei, Qiu Mingxi, Zhu Jikang, et al. Research progress and application prospects of sand-fixing materials in my country[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(10): 138-144.]

[3] 张登山, 吴汪洋, 田丽慧, 等. 青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 627-634. [Zhang Dengshan, Wu Wangyang, Tian Lihui, et al. Erosion effect and specification selection of wheatgrass square sand barrier in the sandy land of Qinghai Lake[J]. Journal of Earth Science, 2014, 34(5): 627-634.]

[4] 马全林, 王继和, 詹科杰, 等. 塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景[J]. 水土保持学报, 2005(1): 36-39, 58. [Ma Quanlin, Wang Jihe, Zhan Kejie, et al. Sand-fixing principle of plastic square sand barrier and its application prospects[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 36-39, 58.]

[5] 丁延龙, 高永, 汪季, 等. 生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 262-269. [Ding Yanlong, Gao Yong, Wang Ji et al. Effects of bio-based degradable polylactic acid (PLA) sand barrier on the particle size characteristics of surface sediments of sand dunes[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 262-269.]

[6] 丁新辉, 刘孝盈, 刘广全, 等. 京津风沙源区沙障固沙技术评价指标体系构建[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5778-5786. [Ding Xinhui, Liu Xiaoying, Liu Guangquan, et al. Construction of evaluation index system for sand barrier sand fixation technology in the source area of Beijing-Tianjin sandstorm[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5778-5786.]

[7] 朴起亨. 几种不同材料机械沙障防风效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010. [Piao Qiheng. Research on the Wind-Proof Effect of Mechanical Sand Barriers of Several Different Materials[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.]

[8] 刘湘杰, 党晓宏, 汪季, 等. 生物基可降解聚乳酸沙障的蚀积特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 113-119. [Liu Xiangjie, Dang Xiaohong, Wang Ji, et al. Erosion characteristics of bio-based degradable polylactic acid sand barrier[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2019, 39(5): 113-119.]

[9] 徐彬. 机械沙障阻沙固沙机理的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Xu Bin. Numerical Simulation Study on the Mecha-

nism of Mechanical Sand Barriers to Prevent Sand and Sand Fixation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]

[10] 马学喜, 李生宇, 王海峰, 等. 固沙网沙障积沙凹曲面特征及其固沙效益分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 898−904. [Ma Xuexi, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Analysis of the characteristics of the surface of the sand traps and sand traps on the sand-fixing network and the benefit of sand-fixing[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 898−904.]

[11] 闫德仁, 袁立敏, 黄海广, 等. 直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 1−7. [Yan Deren, Yuan Limin, Huang Haiguang, et al. Effect of direct pressure vertical gauze sand barrier on near-surface sand transport and wind speed[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 1−7.]

[12] 王燕, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 等. 基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 826−831. [Wang Yan, Meng Zhongju, Si Qingbilige, et al. Study on the distribution characteristics of particle size of farmland surface soil in semi-arid area based on multifractal[J]. Soils, 2018, 50(4): 826−831.]

[13] 李恩菊, 董治宝, 赵景波. 巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 471−478. [Li Enju, Dong Zhibao, Zhao Jingbo. The grain size characteristics of the windward slope of the typical tall sand mountain in Badain Jaran Desert[J]. Arid Area Geography, 2011, 34(3): 471−478.]

[14] Ujvari G, Kok J F, Varga G, et al. The physics of wind-blown loess: Implications for grain size proxy interpretations in Quaternary paleoclimate studies[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 247−278.

[15] de Jong, Maarten F, Baptist, et al. Relationships between macrozoobenthos and habitat characteristics in anintensively used area of the Dutch coastal zone[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(8): 2409−2422.

[16] Dietze Maussion E, Ahlborn F, et al. Sediment transport processes across the Tibetan Plateau inferred from robust grain-size end members in lake sediments[J]. Climate of the Past, 2016 10(1): 91−106.

[17] 黎小娟, 周智彬, 李宁, 等. 尼龙网方格沙障风沙流携砂粒度的空间分异特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 76−84. [Li Xiaojuan, Zhou Zhibin, Li Ning, et al. Spatial differentiation characteristics of the granularity of the sand grids carried by the nylon mesh square sand barriers[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 76−84.]

[18] 王睿, 周立华, 陈勇, 等. 库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 330−336. [Wang Rui, Zhou Lihua, Chen Yong, et al. Protection benefits of the sand prevention measures of the Kubuqi Desert[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 330−336.]

[19] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 803−812. [Ding Yanlong, Gao Yong, Meng Zhongju, et al. Particle size characteristics of wind eroded surface particles in the desert grassland of Hiramuren[J]. Soil, 2016, 48(4): 803−812.]

[20] 杨世荣, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 库布齐沙漠生态光伏电站不同覆盖类型下土壤粒度特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 112−118. [Yang Shirong, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Soil particle size characteristics under different coverage types in Kubuqi Desert ecological photovoltaic power station[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 112−118.]

[21] 王丽英, 李红丽, 董智, 等. 沙柳方格沙障对库布齐沙漠防风固沙效应的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 115−118. [Wang Liying, Li Hongli, Dong Zhi, et al. The influence of sand barrier of sand willow grid on windbreak and sand fixation in Kubuqi Desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 115−118.]

[22] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [Wu Zheng. Aeolian Landform and Desert Control Engineering. [M]. Beijing: Science Press, 2010.]

[23] 万玲玲, 董智, 李红丽, 等. 沙柳方格沙障对库布齐沙漠沙丘粒度分布的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 165−170. [Wan Lingling, Dong Zhi, Li Hongli, et al. The impact of sand barriers on the grain size distribution of sand dunes in Kubuqi Desert [J]. Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 165−170.]

[24] 杜鹤强, 薛娴, 孙家欢. 乌兰布和沙漠沿黄河区域下垫面特征及风沙活动观测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 156−165. [Du Heqiang, Xue Xian, Sun Jiahuan. Characteristics of the underlying surface and wind and sand activity observations along the Yellow River in Ulanbuhe Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 156−165.]

[25] 郭彩赟, 韩致文, 钟帅, 等. 库布齐沙漠新材料沙障的风速廓线特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 260−265. [Guo Caiyun, Han Zhiwen, Zhong Shuai, et al. Wind speed profile characteristics of new material sand barrier in Kubuqi Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 260−265.]

[26] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 新型生物可降解PLA沙障与传统草方格沙障防风效益[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 118−125. [Dang Xiaohong, Gao Yong, Yu Yi, et al. Wind protection benefits of new biodegradable PLA sand barrier and traditional grass grid sand barrier[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37 (3): 118−125.]

[27] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 四种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1060−1068. [Gao Guanglei, Ding Guodong, Zhao Yuanyuan, et al. Effects of four particle size classification systems on the determination of soil volume fractal dimension[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2014, 22(6): 1060−1068.]

[28] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 硬质地HDPE沙障防风效益的风洞试验[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 127−133. [Zhang Shuai, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Wind tunnel test of windproof benefits of HDPE sand barrier with hard texture[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 127−133.]

Grain size characteristics of surface sediments in three low vertical sand barriers

QI Shuai[1], WANG Ji[1,2], DANG Xiaohong[1,2], WEI Yajuan[1], DING Fenqian[1]

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Central and Local Key Laboratory of Wind and Sand Physics, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Hangjin Desert Ecosystem Observation and Research Station, Ordos 017400, Inner Mongolia, China)

Abstract: This research examines the inner surface (0−2 cm) of three types of sand barriers (PLA, Salix, HDPE) of the same specifications that have been laid for three years in the south of Xingba Expressway in the Kubuqi Desert. The mechanical composition of the samples was measured using a laser particle size analyzer, and parameters, such as average particle size, standard deviation, skewness, kurtosis, and fractal dimension, were analyzed. The study area was dominated by medium and fine sand (77.83%−98.00%), and the content of clay and powder particles did not exceed 5%. The PLA and HDPE sand barriers at the bottom of the windward slope of the dunes were manifested by mild wind erosion, and the particle size was relatively coarse. However, from the bottom to the top of the slope, the size of the sand willow sand barrier gradually increased, and there was a change from sedimentation to wind erosion at the top of the slope. Overall, the sediments in the sand barrier were poorly sorted, the skewness developed toward positive or negative deviation, kurtosis developed toward sharpness, the fractal dimension was 1.94−2.20, and the dominant grain size changed to fine sand. The impact of different types of sand barriers on sediments was different. The distribution of sediment particles in the HDPE and PLA sand barriers was more extensive, while the sand willow sand barrier was relatively concentrated and refined. The optimization of particle composition was HDPE> Salix> PLA sand barrier.

Keywords: low vertical sand barrier; windward slope; granularity characteristics; fractal dimension; Kubuqi Desert